

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Rahimi, Amir

Bemessung von Wasserbauwerken hinsichtlich Betonstahlkorrosion

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102348>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Rahimi, Amir (2016): Bemessung von Wasserbauwerken hinsichtlich Betonstahlkorrosion. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Instandhaltung von Wasserbauwerken. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 63-68.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Bemessung von Wasserbauwerken hinsichtlich Betonstahlkorrosion

Dr.-Ing. Amir Rahimi (BAW)

1 Einleitung

Die Betonstahlkorrosion infolge der Chlorideinwirkung ist ein maßgebender Aspekt bei der Dauerhaftigkeit von vielen Verkehrswasserbauwerken. Dies betrifft Bauwerke in maritimer Umgebung sowie im Binnenbereich wie Brücken und Plattformen von Schleusen, die im Winter mit Taumitteln behandelt werden. Dringen Chloride bis zur Betonstahloberfläche vor und erreichen dort eine kritische Konzentration, so wird die schützende Passivschicht des umhüllenden Betons beschädigt. Diese die Korrosion einleitende Phase (Initiierungsphase) verursacht noch keine Schäden am Bauwerk. Erst nach Verlust der Passivschicht kann der Betonstahl bei Vorhandensein bestimmter Randbedingungen (Feuchtigkeit, Sauerstoffzutritt) beginnen zu korrodieren (Schädigungsphase). Ein Fortschreiten dieses Korrosionsprozesses kann, unter Umständen innerhalb kurzer Zeiträume, zur Schädigung des Bauteils mit Folgen für seine Gebrauchstauglichkeit und sogar Tragfähigkeit führen. Eine Depassivierung des Betonstahls ist auch durch die Carbonatisierung der Betondeckung möglich. Aufgrund vorherrschender Feuchtebedingungen ist jedoch eine Gefährdung der Verkehrswasserbauwerke durch eine carbonatisierungsinduzierte Betonstahlkorrosion von untergeordneter Bedeutung.

Die Dauerhaftigkeitsbemessung neu zu errichtender Bauwerke erfolgte bisher mit dem deskriptiven Ansatz der Normung durch die Einhaltung von bestimmten, auf Erfahrungswerten beruhenden Mindestanforderungen an Betonzusammensetzung und Betondeckung, ohne die tatsächliche Leistung des Betons und des Bauteils sowie die Beanspruchung in Betracht zu ziehen. Bei der Beurteilung der Restnutzungsdauer bestehender Bauwerke sowie der Planung von Instandsetzungsmaßnahmen sind die deskriptiven Ansätze zumeist nicht ausreichend bzw. mangels entsprechender Informationen zur Zusammensetzung der Baustoffe nicht anwendbar; praxisgeeignete leistungsbezogene Bemessungsverfahren stehen nicht zur Verfügung.

In Rahimi (2016) wurde ein semiprobabilistisches Nachweiskonzept zur Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauteilen unter Chlorideinwirkung entwickelt, welches durch die Erstellung von Bemessungsnomogrammen vereinfacht wurde. Das Konzept ermöglicht eine Dauerhaftigkeitsbemessung sowohl für neu zu errichtende als auch für mittels Betonersatz instand zu setzende Bauteile und kann zur Bewertung der Restnutzungsdauer bestehender Bauteile angewendet werden. Nachfolgend wird das entwickelte Konzept kurz vorgestellt. Detaillierte Angaben und ausführliche Erläuterungen sind Rahimi (2016) zu entnehmen.

2 Nachweisformate zur Dauerhaftigkeitsbemessung hinsichtlich chloridinduzierter Betonstahlkorrosion

In ZTV-W LB 215 (2012) wird für neu zu errichtende Bauwerke der Expositionsclassen XS2 und XS3 eine Dauerhaftigkeitsbemessung gefordert, falls diese Nutzungsdauern von über 50 Jahren erreichen sollen. Dies geht auf die aktuellen Erkenntnisse der Forschung und der Praxis zurück (u. a. DAfStb (2008), fib (2015)), die belegen, dass selbst bei der Einhaltung der deskriptiven Vorgaben der Normung (DIN EN 206-1 (2001) / DIN 1045-2 (2008)) und der zusätzlichen Regelungen der ZTV-W LB 215 (2012) eine höhere Nutzungsdauer dieser Bauwerke nicht in jedem Fall sichergestellt werden kann. Mit der Dauerhaftigkeitsbemessung ist ein leistungsbasierter Nachweis der Dauerhaftigkeit für die geplante Nutzungsdauer gemeint.

Um eine leistungsbezogene Bewertung und Bemessung der Dauerhaftigkeit zu ermöglichen, wurden vollprobabilistische Prognosemodelle entwickelt. Darin werden statistisch erfasste Parameter der Einwirkung und des Widerstands in einer definierten Grenzzustandsgleichung mit Hilfe einer mathematischen Formel gegenübergestellt, die den zeitlichen Verlauf des Schädigungs- bzw. Transportmechanismus beschreibt. Der Zeitraum, in dem der definierte Grenzzustand mit einer angenommenen Wahrscheinlichkeit (Zuverlässigkeit) nicht erreicht wird, wird als die Nutzungsdauer bezeichnet. Im Fall der chloridinduzierten Betonstahlkorrosion wird als Grenzzustand das Erreichen eines kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts an der Betonstahloberfläche angenommen, der zur Depassivierung des Betonstahls führt (Modell von Gehlen (2000), fib (2006), ISO 16204 (2012)). Die zeit- und tiefenabhängige Konzentration der Chloride im Beton wird anhand einer auf dem Fick'schen Diffusionsgesetz basierten Formulierung ermittelt, Gleichung (1):

$$C(x, t) = C_0 + (C_{s, \Delta x} - C_0) \cdot \operatorname{erfc} \frac{x - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{app}(t) \cdot t}} \quad (1)$$

Darin sind:

$C(x, t)$: Chloridkonzentration in der Tiefe x zum Zeitpunkt t in Massenprozent bezogen auf den Bindemittelgehalt [M.-%/b]

C_0 : Eigenchloridgehalt des Betons [M.-%/b] (bei $C_0 < 0,1$ M.-%/b wird dieser Parameter gleich Null gesetzt)

$C_{s, \Delta x}$: Chloridkonzentration in der Tiefe Δx (bei $\Delta x = 0$ an der Bauteiloberfläche) zum Beobachtungszeitpunkt in Abhängigkeit der anstehenden Chloridquelle, welche als konstante Einwirkung angenommen wird (Oberflächenchloridkonzentration) [M.-%/b]

x : Tiefe mit einem korrespondierenden Chloridgehalt $C(x, t)$ [m]

Δx : Tiefenbereich, in dem ggf. das Chlorideindringverhalten durch intermittierende Chlorideinwirkung vom Fick'schen Verhalten abweicht [m]

t : Betonalter [s]

$D_{app}(t)$: scheinbarer (apparent) Chloriddiffusionskoeffizient des Betons [m²/s], Größenordnung abhängig von der Auslagerungszeit. Die Variable wird jedoch bei allen Berechnungen für den gesamten betrachteten Zeitraum von $t_{exposition}$ (~ 0) bis t als Konstante angesetzt.

erfc : Komplementäre der Gauß'schen Fehlerfunktion ($= 1 - \operatorname{erf}$)

Zur Ermittlung der Kenngröße $D_{app}(t)$ als Variable des Materialwiderstands wurden drei Ansätze definiert (Tabelle 1), die in Abhängigkeit des einzusetzenden Produkts, der Informationsstände, des realisierbaren Zeit- und Kostenaufwands und der notwendigen Zuverlässigkeit verwendet werden können.

Tabelle 1: Ansätze zur Ermittlung des Materialwiderstands scheinbarer Chloriddiffusionskoeffizient $D_{app}(t)$

	Ansatz A	Ansatz B	Ansatz C
Prüfverfahren / Hilfsmittel	Diffusionsversuche	RCM-Versuch + (große) Diffusionsversuch + (ver- Bauwerksdaten; Altersex- ponent kann aus der Lite- ratur abgelesen werden	Diffusionsversuch + (ver- einzelte) Bauwerksdaten
Anwendungsfälle	neue Produkte mit fehlen- der Erfahrungsbasis, Produkte mit unbekannter Zusammensetzung	Herkömmliche Produkte mit vorhandener Erfah- rungsbasis und bekannter Zusammensetzung	Bauwerksdaten entspre- chend dem Design- Produkt und der Design- Exposition vorhanden
Aufwand	sehr hoch	sehr gering	mittel
Versuchsdauer ¹⁾	mind. zwei Jahre	ca. 5 Wochen	ca. 9 Wochen
Formel	$D_{app,A}(t) = k_e \cdot D_{nss}(t_0) \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^{\alpha_{nss}}$	$D_{app,B}(t) = k_e \cdot D_{RCM}(t_0) \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^{\alpha_{RCM}}$	$D_{app,C}(t) = k_e \cdot D_{nss}(t_0) \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^{\alpha_{app}}$
D_{nss} : Chloriddiffusionskoeffizient (non-steady state chloride diffusion coefficient) m ² /s D_{RCM} : Chloridmigrationskoeffizient ermittelt in RCM-Versuch m ² /s α : Altersexponent; der Index gibt die Methode zur Ermittlung des Kennwertes [–] t_0 : Referenzzeitpunkt (28 d) [s] k_e : Umweltparameter zur Berücksichtigung der Umgebungstemperatur [–] ¹⁾ von der Herstellung der Probekörper bis zur Gewinnung der Ergebnisse, d. h. Messung der Eindringtiefen bei RCM oder chemische Analyse der Mehlproben bei Diffusionsversuch			

Die Anwendung vollprobabilistischer Nachweiskonzepte bedarf gesonderter Fachkenntnisse und spezieller numerischer Software. Deshalb finden derartige Konzepte keine breite Anwendung in der Praxis. Vollprobabilistische Konzepte können auf ein semiprobabilistisches Format vereinfacht werden, indem die Modellvariablen nicht mehr als statistisch verteilte charakteristische Größen berücksichtigt werden, sondern mit Bemessungswerten. Die Bemessungswerte entstehen durch die Berücksichtigung der charakteristischen Werte der Variablen, z. B. Mittelwerte, mit multiplikativen oder additiven Teilsicherheitsbeiwerten. Die Teilsicherheitsbeiwerte berücksichtigen die möglichen ungünstigen Abweichungen der tatsächlichen Einwirkungs-, Widerstands- und Geometriegrößen von den charakteristischen Werten sowie die Modellunsicherheiten. Die Größen der Teilsicherheitsbeiwerte werden so gewählt, dass die Zielzuverlässigkeit beim Erreichen des Grenzzustands innerhalb der geplanten Nutzungsdauer stets eingehalten wird. Sie wurden für das vorliegende Konzept auf Basis vollprobabilistischer Bemessungen abgeleitet.

Um eine Auseinandersetzung mit komplexen Gleichungen zu umgehen und die Bemessung möglichst einfach zu gestalten, wurden aus dem semiprobabilistischen Nachweisformat Bemessungsnomogramme entwickelt. Beim Nachweisformat mit Nomogrammen wird der funktionale Zusammenhang zwischen den gewichteten Modellvariablen aus dem semiprobabilistischen Nachweis-

format graphisch dargestellt, wobei nur eine stark reduzierte Anzahl der Modellvariablen berücksichtigt wird. Die Nachweisformate und ihr Zusammenhang sind im Bild 1 dargestellt.

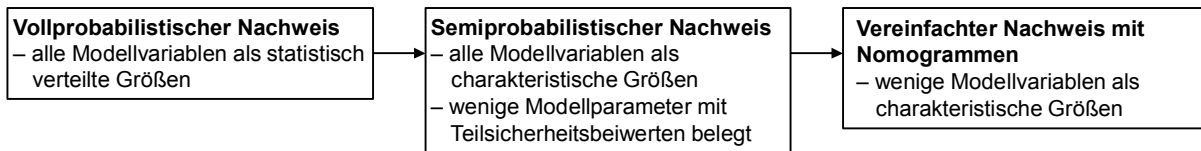


Bild 1: Nachweisformate und ihr Zusammenhang

3 Nachweiskonzept mit Nomogrammen

Als Bemessungswerte wurden im semiprobabilistischen Nachweisformat die wichtigsten Variablen des Materialwiderstands, der Einwirkung und der Geometrie des Bauteils ausgewählt, welche dann die Ein- und Ausgangsparameter der Bemessungsnomogramme darstellen. Ein Bemessungsnomogramm ist beispielhaft im Bild 2 dargestellt. Darin beschreiben die Parameterpaare $D_{RCM}(t_0)$ und α_{RCM} bzw. $D_{nss}(t_0)$ und α_{nss} bzw. $D_{nss}(t_0)$ und α_{app} den Materialwiderstand gegenüber Chlorideindringen, $C_{S, Ax}$ die Einwirkung und c_{min} die Mindestbetondeckung des Bauteils für eine Zielnutzungsdauer von $t_{SL} = 70$ Jahren und für eine Zielzuverlässigkeit von $\beta_0 = 1,5$ (entspricht einer Eintrittswahrscheinlichkeit von rd. 6,7 %) für die Expositionsklassen XS3 und XD3. Beispielhaft (rote Pfeile) wurde für eine vorgegebene Mindestbetondeckung von 60 mm und einer angenommenen Oberflächenchloridkonzentration von 4,0 % bezogen auf den Bindemittelgehalt (Einwirkung) der notwendige Materialwiderstand (α und $D(t_0)$) abgelesen.

Aufgrund der Zeitabhängigkeit des Materialwiderstands gegenüber Chlorideindringen kann eine Variation der Zielnutzungsdauer durch zusätzliche unterschiedliche Kurvenschare nicht im Nomogramm berücksichtigt werden. Somit wurden in Rahimi (2016) Nomogramme für verschiedene Zielnutzungsdauern von 10, 20, 30, 40, 50, 70 und 100 Jahren erstellt. Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die insgesamt 19 Nomogramme, die in Abhängigkeit der geforderten Zuverlässigkeit und der Zielnutzungsdauer für eine Bemessung verwendet werden können. Für eine bessere Lesbarkeit der Nomogramme wurde der Parameter $DRCM(t_0)$ bzw. $D_{nss}(t_0)$ zum Teil in zwei Bereichen 0 bis 2 m²/s und 2 bis 20 m²/s separiert.

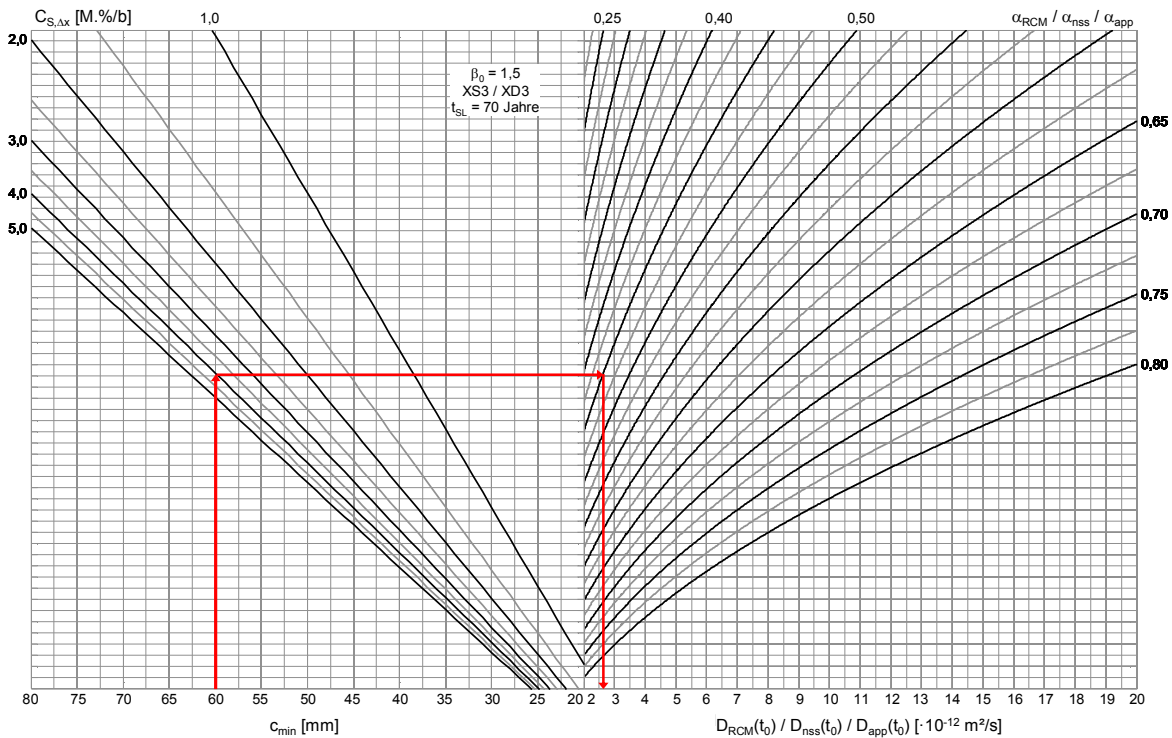


Bild 2: Bemessungsnomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=70$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=1,5$, $2 \leq D(t_0) \leq 20$

Tabelle 2: Übersicht über die Nomogramme zur Dauerhaftigkeitsbemessung für die Expositionsklassen XS3/XD3¹⁾

Zielwert des Zuverlässigkeitsindex β_0	Zielnutzungsdauer t_{SL}	Nomogramm-Nr.		
		$D_{RCM}(t_0)$ bzw. $D_{nss}(t_0) [\cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}]$ ²⁾		
		0 – 2	2 – 20	0 – 20
1,5	100	1	2	
	70	3	4	
	50	5	6	
	40	7	8	
	30	9	10	
	20			11
	10			12
0,5	100			13
	70			14
	50			15
	40			16
	30			17
	20			18
	10			19

¹⁾ für die Expositionsklassen XS2 / XD2 können dieselben Nomogramme verwendet werden, wenn die Mindestbetondeckung als **Ausgangsparameter** um den Betrag 10 mm (Konvektionszone Δx) verringert wird, d. h. $c_{min} - 10 \text{ mm}$. Falls jedoch die Mindestbetondeckung als **Eingangsparameter** verwendet wird, ist diese um 10 mm zu erhöhen, d. h. $c_{min} + 10 \text{ mm}$.

²⁾ teilweise Aufteilung in den Bereichen 0 bis 2 m^2/s und 2 bis 20 m^2/s für eine bessere Lesbarkeit der Nomogramme

Die Nomogramme können neben der Bemessung von neu zu errichtenden Bauteilen auch zur Bemessung der Schichtdicke beim Betonersatz für den Fall angewendet werden, dass die alte Betondeckung vollständig und ggf. weitere mit Chlorid belastete Bauteilbereiche entfernt werden. Des Weiteren können die Nomogramme zur Abschätzung der Restnutzungsdauer bestehender Bauwerke vor einer Instandsetzungsmaßnahme verwendet werden (Variable $D_{app}(t_0)$ dient diesem Zweck, s. Rahimi (2016)).

Literatur

- DAfStb (2008): Positionspapier des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton zur Umsetzung des Konzepts von leistungsbezogenen Entwurfsverfahren unter Berücksichtigung von DIN EN 206-1, Anhang J. In Beton- und Stahlbetonbau 103, 2008, Heft 12, Seiten 837 bis 839.
- fib (2006): *fib* bulletin 34: Model Code for Service Life Design. Prepared by fib Task Group 5.6.
- fib (2015): *fib* bulletin 76: Benchmarking of Deemed-to-Satisfy Provisions in Standards – Durability of Reinforced Concrete Structures Exposed to Chlorides. Prepared by fib Task Group 8.6: Gehlen, C., Greve-Dierfeld, S. v., Gulikers, J., Helland, S., Rahimi, A. et al.
- Gehlen, C. (2000): Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 510. Beuth, Berlin, Dissertation.
- ISO 16204 (2012): Durability – Service life design of concrete structures.
- Rahimi, A. (2016): Semiprobabilistisches Nachweiskonzept zur Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauteilen unter Chlorideinwirkung. Dissertation Technische Universität München.
- ZTV-W LB 215 (2012): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton (Leistungsbereich 215), Ausgabe 2012. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS).